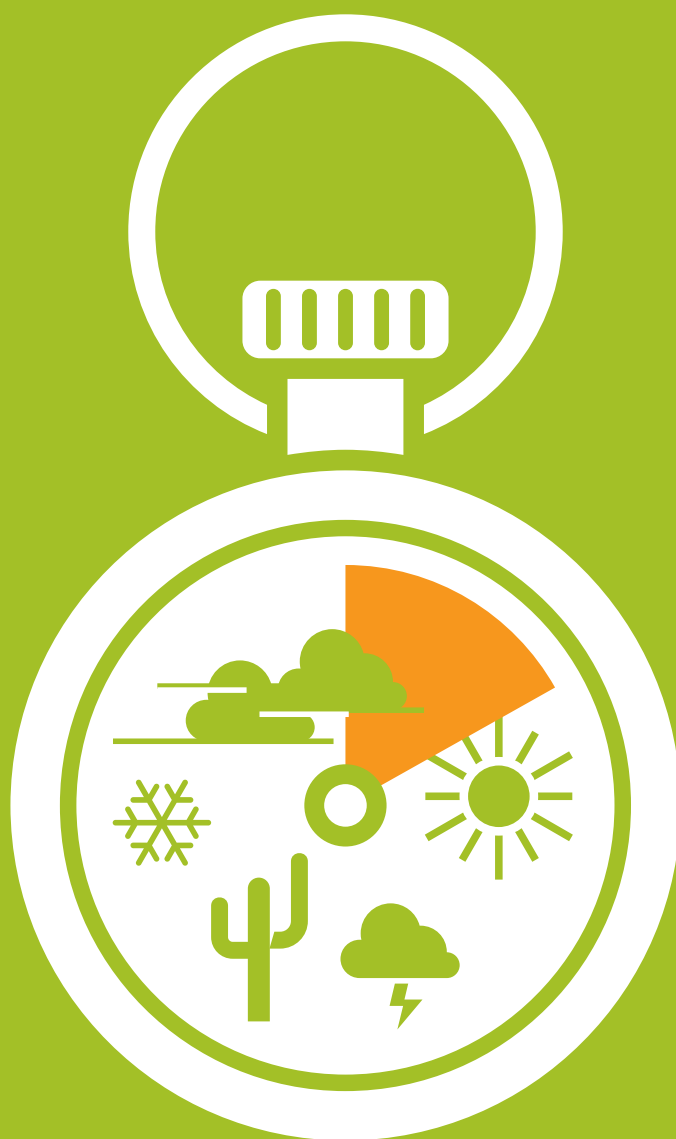


Macht die Erderwärmung eine Pause?

Globale Erwärmung und Klimavariabilität



Prof. Dr. Guy Brasseur
 Prof. Dr. Mojib Latif
 Dr. Irene Fischer-Bruns

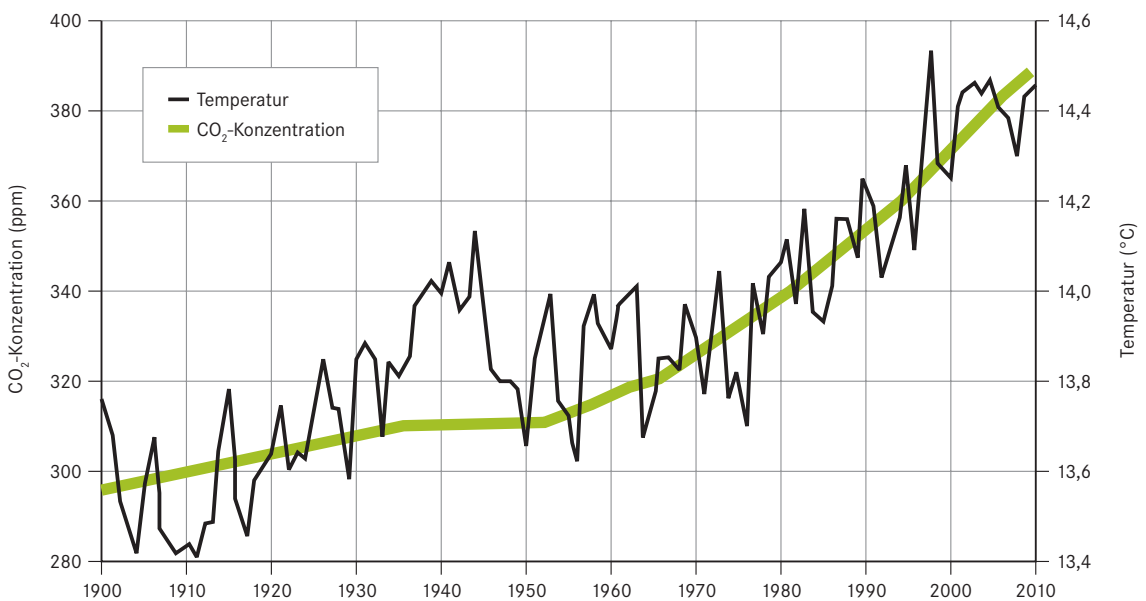
Während der gesamten Erdgeschichte hat das Klima unseres Planeten geschwankt. Seit Beginn der Industrialisierung kommt ein neuer Faktor hinzu: der Mensch. Wie stark ist der menschliche Einfluss auf das Klima im Verhältnis zur natürlichen Klimavariabilität?

Es gibt zwei Arten von Klimaschwankungen: externe und interne. Die externen Schwankungen werden durch z.B. Änderungen der Leuchtkraft der Sonne, der Erdparameter – wie die Neigung der Erdachse – oder der Zusammensetzung der Atmosphäre etwa durch Vulkanausbrüche ausgelöst, aber auch durch den menschlichen Einfluss. Interne Schwankungen sind im Wesentlichen chaotischer Natur und beruhen u. a. auf dem Zusammenspiel von Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberfläche.

Der Mensch als externer Faktor beeinflusst das Klima hauptsächlich durch die Freisetzung von Kohlendioxid (CO₂). Fast 90% des gegenwärtigen Ausstoßes verursacht dabei die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas zur Energiegewinnung. Inzwischen ist der CO₂-Gehalt der Luft so hoch wie nie zuvor in der Geschichte der Menschheit. Kohlen-

dioxid führt zur Erwärmung der Erdoberfläche. Seit 1900 ist die Erdoberflächentemperatur im weltweiten Durchschnitt um etwa 0,8° C gestiegen (Abb. 1). Die Auswirkungen sind unübersehbar: Die Eispanzer Grönlands und der Antarktis ziehen sich zurück. Die Meere erwärmen sich. Und der Meeresspiegel ist um ca. 20 cm gestiegen. Dabei geht der Anstieg zu etwa gleichen Teilen auf die Eisschmelze und die Wärmeausdehnung der Meere zurück, wobei in den letzten Jahren der Anteil der Eisschmelze bereits überwogen hat.

Abb. 1: CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre und mittlere globale oberflächennahe Lufttemperatur zwischen 1900 und 2010 (nach Latif, 2012, aktualisiert).



Faktoren der Temperaturentwicklung

Die Entwicklung der Erdoberflächentemperatur ergibt sich aus der Überlagerung aller Faktoren, natürlicher wie anthropogener. Daraus erklärt sich ihre unregelmäßige Entwicklung seit Beginn des 20. Jahrhunderts (Abb. 1). Der langfristige Erwärmungstrend ist zwar offensichtlich. Doch kam es aber auch vor, dass die Erdoberflächentemperatur für einige Jahre oder Jahrzehnte kaum anstieg oder sogar abnahm – trotz des Anstiegs der Konzentration der Treibhausgase und der daraus resultierenden Verstärkung des Treibhauseffekts.

Seit etwa 15 Jahren ist die mittlere Erdoberflächentemperatur praktisch nicht mehr gestiegen, obwohl die Störung im Strahlungshaushalt am oberen Rand der Atmosphäre durch das Mehr an Treibhausgasen von 1 W/m^2 eine Erwärmung erwarten ließ.

Solche Phasen überraschen Klimaforscher – aufgrund der starken internen Klimavariabilität – nicht: Nahezu periodische Klimaphänomene wie El Niño, La Niña oder die Pazifische Dekadische Oszillation (PDO) (siehe Box 1) beeinflussen die mittlere Temperatur der Erde ständig (Abb. 2).

Negative Phasen der PDO führen wie La-Niña-Ereignisse zu einem vorübergehenden Rückgang der mittleren Erdoberflächentemperatur. Eine aktuelle Modellstudie (Kosaka/Xie, 2013) zeigt, dass La-Niña-Ereignisse zusammen mit der negativen Phase der PDO die gegenwärtige Erwärmungspause erklären können. Allerdings wählten die Autoren eine

Modellierungsstrategie, die durchaus Anlass zur Kritik gibt. Alternative Hypothesen führen eine schwächere Sonnenstrahlung, einen höheren Aerosolgehalt der Atmosphäre durch Vulkane oder eine gestiegene Feuchtigkeit in der Stratosphäre als kompensierende Effekte an. Aber keine dieser alternativen Hypothesen kann allein das gegenwärtige Temperaturplateau ausreichend erklären.

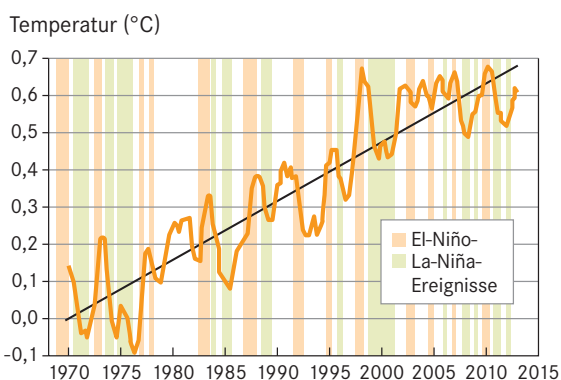


Abb. 2: Abweichung der Erdoberflächentemperatur relativ zum Mittelwert 1901–2000 (übergreifendes Mittel über 12 Monate) und linearer Trend. Die El-Niño- und La-Niña-Ereignisse (basierend auf den Niño-3.4-Anomalien der Meeresoberflächentemperatur) sind farblich markiert. Datenbasis: NOAA (aus: Trenberth/Fasullo, 2013)

Energiebilanz

Wenn die zusätzliche Energie durch den bisherigen Anstieg der Konzentration der Treibhausgase der letzten Jahre nicht zu einer weiteren Erwärmung der Erdoberfläche beigetragen hat, wo ist sie dann geblieben? Es ist nahe liegend, dass die Meere einen Großteil dieser Wärme aufgenommen haben. Messungen, u.a. mittels Tausender Treibbojen, sogenannter ARGO-Floats (siehe Box 2), bestätigen dies. Bei Betrachtung der oberen 2000 m der Meere ist nach wie vor ein deutlicher Anstieg des ozeanischen Wärmeinhalts zu erkennen (Abb. 3), eine Erwärmungspause gibt es hier nicht. Für die obersten 700 m ist allerdings ein geringerer Anstieg zu erkennen. Daraus folgt, dass die darunterliegenden Schichten vermehrt Wärme aufgenommen haben müssen.

Die momentane Erwärmungspause ist kein außergewöhnliches Ereignis. Ähnliche Situationen wurden seit Beginn der instrumentellen Messungen vor etwa 150 Jahren mehrfach beobachtet. Zur Bewertung des menschlichen Einflusses auf das Klima ist es daher unerlässlich, Zeiträume von vielen Jahrzehnten zu betrachten. Auch wenn der anthropogene Klimawandel zukünftig eine immer größere Rolle spielen wird, so werden nach wie vor auch natürliche – interne wie externe – Klimaschwankungen unterschiedlicher Dauer auftreten, die

den langfristigen Erwärmungstrend überlagern. Andere Klimaparameter wie der globale Meeresspiegel reagieren weniger sprunghaft als die Lufttemperatur. Der Meeresspiegel ist während der letzten Jahre beständig weiter gestiegen. Das Klimasystem erwärmt sich nach wie vor. Von einer Entwarnung in Sachen Klimawandel kann daher keine die Rede sein.

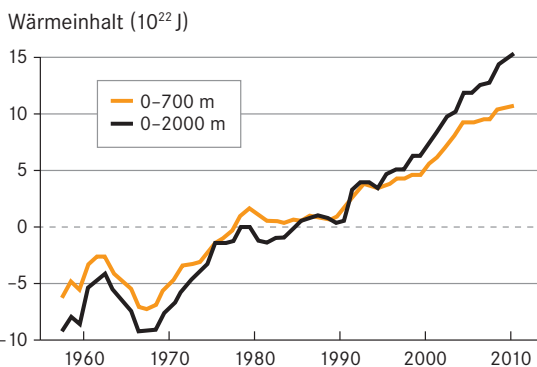


Abb. 3: Vergleich des gemessenen globalen ozeanischen Wärmeinhalts der Schichten 0–700 m und 0–2000 m (siehe http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/, dortige Abb. 3)

Telekonnektionsmuster im Klimasystem

Das Klima ändert sich beständig. Wissenschaftler haben schon vor langer Zeit wiederkehrende Muster, sogenannte Telekonnektionsmuster, identifiziert, deren zeitliche Entwicklung zur Beschreibung der Klimavariabilität dient. Ein Telekonnektionsmuster ist definiert als ein Muster einer Klimavariablen (z. B. Temperatur oder Druck) mit ganz individuellen regionalen Merkmalen und oftmals einer oszillierenden Zeitentwicklung. Im Folgenden werden die wichtigsten Telekonnektionsmuster kurz beschrieben:

- **North Atlantic Oscillation (NAO):** Eine der wichtigsten Klimafluktuationsmuster im nordatlantischen Raum, die die Stärke der Westwinde und die Zyklonenzugbahnen bestimmt. Die NAO schwankt mit unterschiedlicher Periodizität und ist daher schwer vorhersagbar. Sie beeinflusst maßgeblich Temperatur und Niederschläge auf der Nordhalbkugel, insbesondere auch in Europa.
- **Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO):** Ein Telekonnektionsmuster der Meeresoberflächentemperatur im Nordatlantik mit einer mittleren Periode von etwa 60 Jahren. Diese langperiodische Schwankung beeinflusst z. B. die atlantische Hurrikanaktivität und den Niederschlag in der Sahelzone.
- **El Niño Southern Oscillation (ENSO):** Das bekannte Phänomen ist mit einem globalen Telekonnektionsmuster verbunden und beeinflusst deswegen das Klima weltweit. ENSO ist eine quasiperiodische Schwankung der Meeresoberflächentemperatur im äquatorialen Ost- und Zentralpazifik. Die warmen Phasen werden als El Niño, die kalten als La Niña bezeichnet. ENSO besitzt eine mittlere Periode von etwa 4 Jahren.
- **Pacific Decadal Oscillation (PDO):** Ein Telekonnektionsmuster der Meeresoberflächentemperatur im Pazifik nördlich von 20° N mit einer mittleren Periode von etwa 50 Jahren. Die PDO wirkt insbesondere auf das Klima Nordamerikas, beeinflusst aber auch die Meeresoberflächentemperatur des äquatorialen Pazifik und hat deswegen globale Auswirkungen.

- **Quasi-Biennial Oscillation (QBO):** Hierbei handelt es sich um eine Umkehr des zonalen Windes in der äquatorialen Stratosphäre, dem zweiten Stockwerk der Atmosphäre, mit einem Einfluss auf das tropische Klima. Die Periode beträgt etwa 28 Monate.

- **Madden-Julian Oscillation (MJO):** Ein Zirkulationsmuster der Tropen zwischen 20° N und 20° S, mit stärkster Ausprägung über dem Indischen Ozean und dem Westpazifik und einer 30- bis 60-tägigen Periode. Die MJO hat einen großen Einfluss auf den indischen Sommermonsun.

- **Southern Annular Mode (SAM):** Das Muster beschreibt den Luftdruckgegensatz zwischen den mittleren Breiten der Südhalbkugel und dem Südpol. Die SAM hat einen starken Einfluss auf das Klima der Südhalbkugel und die Intensität der dortigen Windregime und wirkt sich damit auch auf die Zirkulation des südlichen Ozeans aus.

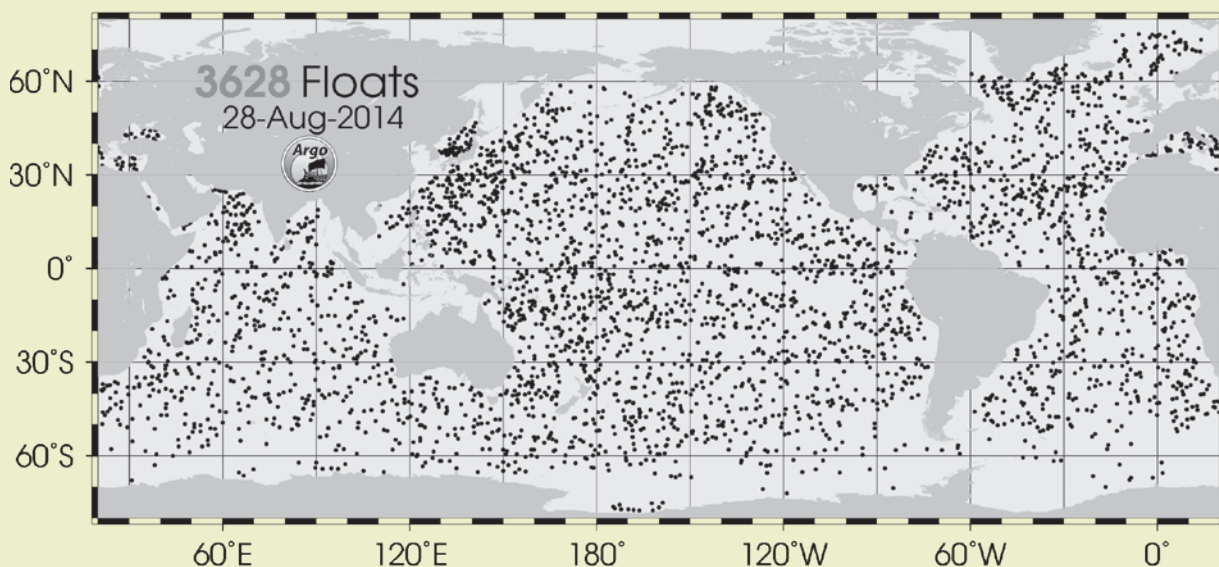
Diese zum Teil oszillatorischen Phänomene spielen eine bedeutende Rolle in der Klimaentwicklung auf Zeitskalen von Monaten bis Jahrhunderten. Die Mechanismen hinter diesen Phänomenen umfassen komplexe Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Klimasubsystemen (Atmosphäre, Ozean, Meereis usw.) und Rückkopplungsprozesse im Erdsystem, die bislang noch nicht vollständig verstanden sind. Klimamodelle simulieren zufriedenstellend die Telekonnektionsmuster und ihre zeitliche Variabilität und zeigen deswegen ein Maß an interner Klimavariabilität, das mit den Beobachtungen konsistent ist. Die Vorhersagbarkeit der Muster ist noch nicht abschließend geklärt und Gegenstand aktueller Forschungen.

Das ARGO-Beobachtungssystem

Für die kontinuierliche Überwachung der Weltmeere wurde im Rahmen des internationalen Projekts ARGO ein globales Netz von über 3600 frei driftenden Messstationen (sog. ARGO-Floats) aufgebaut. ARGO ist ein Programm der globalen Klimaforschung. Es wird unter der Beteiligung von zurzeit 23 Ländern weltweit finanziert. Mit den gewonnenen Messdaten lässt sich die saisonale bis dekadische Variabilität im Ozean dokumentieren. Dies hilft der Wissenschaft, den Einfluss der globalen Erwärmung auf die Meere zu verstehen und die Klimavorhersagen zu verbessern.

Die ARGO-Floats, etwa 1,50 m lange, mit Messgeräten versehene Röhren, werden von Forschungsschiffen zu Wasser gelassen. Bis zu einer Dauer von fünf Jahren führen sie selbstständig Profilmessungen durch, indem sie zunächst in eine Wassertiefe von 1500 m abtauchen und dann etwa zehn Tage mit der Strömung driften. Danach sinken sie tiefer auf 2000 m und führen während eines etwa sechstündigen Aufstiegs an die Oberfläche Profilmessungen durch. Die Floats liefern in erster Linie Daten zu Temperatur und Salzgehalt des Meerwassers. Außerdem geben ihre Signale Aufschluss über die Strömung. Die Daten werden von Satelliten übertragen und sind quasi in Echtzeit frei im Internet verfügbar.

Abb. 4: Positionen der 3628 ARGO-Floats am 28.08.2014
(Abbildung aus: <http://www.argo.ucsd.edu/>)



„Dieser Zustand wird wieder zusammenbrechen“

Interview mit **Kevin Trenberth**, Klimaforscher am National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, USA

Ist diese Erwärmungspause ein außergewöhnliches Ereignis und wenn nein, warum wurde sie nicht von den Klimamodellen vorhergesagt?

Mit dieser Erwärmungspause sind einige einzigartige Aspekte verbunden. Ihre Ursachen liegen hauptsächlich in der natürlichen Variabilität im Klimasystem und insbesondere am Phänomen der Pacific Decadal Oscillation (PDO).

Da die globale Erwärmung erst in den 1970er-Jahren groß genug war, um von der Wissenschaft wahrgenommen zu werden (das entsprechende Signal war größer geworden als das „Hintergrundrauschen“ der natürlichen Variabilität), gibt es bisher nur ein Beispiel für eine Änderung in der PDO, das aus dem Jahr 1999. Wir wissen, dass sich die globale Erwärmung von 1976 bis 1998 etwas verstärkt hat, da in diesem Zeitraum mehr Wärme in geringeren Ozeantiefen gespeichert wurde. Dagegen wurde in der Periode danach mehr Wärme im tieferen Ozean unterhalb von 700 m gespeichert (insgesamt 30%). Sie war somit nicht an der Ozeanoberfläche spürbar. Da diese Vorgänge im Wesentlichen eine Folge der natürlichen Variabilität sind, waren sie nicht vorhersagbar. Die PDO beeinflusst El-Niño-Ereignisse, individuelle El Niño Ereignisse sind (theoretisch) für etwa 18 Monate im Voraus vorhersagbar (in der Praxis ist dieser Zeitraum etwas kürzer).

Es sollte daher gefragt werden, warum die Erwärmungspause nicht erwartet wurde und wie gut Klimamodelle die natürliche Variabilität des Klimasystems und El-Niño-Ereignisse sowie die Änderung eines PDO-Telekonnektionsmusters simulieren können. Dies stand in der Klimawissenschaft bisher nicht im Fokus. Tatsächlich können viele der heutigen Klimamodelle El-Niño-Ereignisse nicht realistisch simulieren.

Unser Fokus lag bisher auf den langfristigen Projektionen anthropogener Klimaänderungen. Da diese „angetrieben“ sind, ist auch vorhersagbar, wie sich die anthropogenen Klimafolgen entwickeln. Projektionen sind an ein bestimmtes Emissionsszenario gebunden und werden nicht initialisiert wie Wettervorhersagen, die vom jetzigen Zustand aus gestartet werden. Für Klimavorhersagen ist die möglichst exakte Beschreibung des Anfangszustands von Ozean und Meereis am wichtigsten, gefolgt von der Zustandsbeschreibung des Landes und der Vegetation. Es werden hierfür sehr gute Klimamodelle benötigt, die keine systematische Abweichung (Bias) haben, sodass sie sich an die realen Anfangsdaten anpassen. Dies ist zurzeit Gegenstand der Forschung.

Wann muss man damit rechnen, dass die Erwärmungspause vorbei ist?

Wir haben die PDO bisher noch nicht gut verstanden. Wir nehmen an, dass der gegenwärtige „Schalter“ in die negative

Phase als Folge des starken El-Niño-Ereignisses 1997/98 „umgelegt wurde“, was durch immense Wärmeflüsse aus dem Ozean das wärmste Jahr (1998) im 20. Jahrhundert erzeugte. Der Ozean kühlte sich entsprechend ab. In der negativen Phase stauten starke Passatwinde im Westpazifik warmes Wasser aus der Tiefe an. In einigen Gebieten wie den Philippinen stieg der Meeresspiegel bis zu 10 mm pro Jahr, wie seit 1992 millimetergenau gemessen werden kann, seit die Satelliten mit Altimetern (Höhenmessern) bestückt sind. Seit 1993 steigt der Meeresspiegel global im Mittel um 3,2 mm pro Jahr. In einigen Gebieten des Ostpazifiks ist er jedoch gesunken, insgesamt liegt er seit 1993 im Westpazifik über 20 cm höher als im Ostpazifik. Das Wasser will nach Osten zurückschwappen, wird aber von den starken Winden daran gehindert. Das kann so nicht mehr lange weitergehen. Irgendwann, vielleicht ausgelöst durch ein zufälliges Wetterereignis, wird dieser Zustand zusammenbrechen und es wird ein El-Niño-Ereignis geben, das uns zurück in eine positive PDO-Phase bringt. Die Erwärmungsmuster rund um den Erdball werden sich dann ändern und die globale Mitteltemperatur wird umso stärker steigen. Das größte damit verbundene Risiko besteht wahrscheinlich in zunehmenden Dürren über Land, wie sie mit El-Niño-Ereignissen verbunden sind.

Neueste Studien weisen darauf hin, dass die Messdaten einiger arktischer Stationen nicht in die globalen Temperaturanalysen eingegangen sind, und dass die globale Mitteltemperatur weiter ansteigen würde, wenn sie berücksichtigt würden. Was sagen Sie dazu?

Dies betrifft in erster Linie den Datensatz HADCRU (vom Hadley Centre in England und von der Climate Research Unit an der University of East Anglia in Großbritannien). Es ist in jedem Fall wichtig, die Beobachtungen aus der Arktis adäquat zu berücksichtigen. Dies ist nicht immer angemessen geschehen, da sie z.B. nicht in vollem Umfang in die Analysen des ozeanischen Wärmehalts eingegangen sind. So befinden sich keine der ARGO-Floats in der Arktis. Das Verfolgen der Ursachen für das Ungleichgewicht in der globalen Energiebilanz und Untersuchungen darüber, wohin diese Energie geht, sollte künftig eine hohe Priorität in der Klimaforschung haben.

Kevin Trenberth

Der Klimawissenschaftler und Distinguished Senior Scientist am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, USA hat mehr als 500 wissenschaftliche Publikationen verfasst. Er gehört zu den 20 im Bereich der Geophysik am häufigsten zitierten Autoren.

Kurz & knapp zusammengefasst:

- Die Entwicklung der Erdoberflächentemperatur ergibt sich aus der Überlagerung mehrerer Faktoren, natürlicher wie anthropogener.
- Seit etwa 15 Jahren ist die mittlere Erdoberflächentemperatur kaum noch gestiegen. Dies ist jedoch kein außergewöhnliches Ereignis.
- Von einer Entwarnung in puncto Klimawandel kann keine Rede sein.

Weiterführende Informationen, Literatur und Weblinks zum Thema unter:

www.climate-service-center.de/hiatus

Referenzen und weiterführende Literatur

Balmaseda, M.A.; Trenberth, K. E.; Källén, E.: *Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content*. In: *Geophysical Research Letters* 40 (2013), S. 1754–1759. DOI: 10.1002/grl.50382

Guemas, V.; Doblas-Reyes, F. J.; Andreu-Burillo, I.; Asif, M.: *Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade*. In: *Nature Climate Change* 3 (2013), S. 649–653. DOI: 10.1038/nclimate1863

Held, I. M.: *Climate science: The cause of the pause*. In: *Nature* 501 (2013), S. 318–319. DOI: 10.1038/501318a

Latif, M.: *Globale Erwärmung*. Stuttgart: Ulmer, 2012.

Latif, M.; Martin, T.; Park, W.: *Southern Ocean Sector Centennial Climate Variability and Recent Decadal Trends*. In: *Journal of Climate* 26 (2013), S. 7767–7782. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00281.1

Kosaka Y.; Xie, S.-P.: *Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling*. In: *Nature* 501 (2013), S. 403–407. DOI: 10.1038/nature12534

Meehl, G. A.; Arblaster, J. M.; Fasullo, J. T.; Hu, A.; Trenberth, K. E.: *Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods*. In: *Nature Climate Change* 1 (2011), S. 360–364. DOI: 10.1038/nclimate1229

Trenberth, K. E.; Fasullo, J. T.: *An apparent hiatus in global warming?* In: *Earth's Future* 1, 1 (2013), S. 19–32. DOI: 10.1002/2013EF000165

Autoren und Autorin

Prof. Dr. Guy Brasseur

Der ehemalige Direktor des Climate Service Center ist Atmosphärenwissenschaftler und Distinguished Scholar am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, USA. Gegenwärtig forscht er am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg.

Prof. Dr. Mojib Latif

Der renommierte und aus den Medien bekannte Klimaexperte ist Meteorologe und Professor am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR). Dort leitet er den Forschungsbereich „Ozeanzirkulation und Klimadynamik“.

Dr. Irene Fischer-Bruns

Die Meteorologin arbeitet seit 2009, dem Gründungsjahr, am Climate Service Center. Vorher war sie in verschiedenen Forschungsprojekten am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, tätig.

Impressum

Herausgeber:

Climate Service Center 2.0 des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Fischertwiete 1, 20095 Hamburg, www.climate-service-center.de

Redaktion:

Climate Service Center 2.0 des Helmholtz-Zentrums Geesthacht

Gestalterisches Konzept, Layout und Satz:

Kristina Düllmann Kommunikationsdesign, www.kristina-duellmann.com

Gesamtherstellung und Druck:

Druckerei Siepmann GmbH, www.siepmanndruck.de

1. Auflage: 1500 Ex., Februar 2015

© Climate Service Center 2.0 des Helmholtz-Zentrums Geesthacht
Alle Rechte vorbehalten